

文章编号: 0258-7025(2006)12-1585-05

# 种子注入式单纵单横电光调 Q 激光器

郭少锋<sup>1,2</sup>, 林文雄<sup>1</sup>, 黎 全<sup>3</sup>, 陈 燧<sup>2</sup>, 林宗志<sup>2</sup>, 黄见红<sup>1</sup>, 陆启生<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002  
<sup>2</sup> 国防科学技术大学<sup>2</sup> 光电科学与技术学院, <sup>3</sup> 理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 基于种子注入技术、干涉法腔模锁定方案以及自滤波非稳腔技术,设计并研制出一套单纵单横电光调 Q 脉冲激光器系统。该系统输出的基波(波长 1064 nm)能量达到 600 mJ, 倍频后绿光能量达到 300 mJ, 发散角接近衍射极限, 线宽接近傅里叶变换极限, 在强气流强振动环境中单纵模的锁定概率为 100%。实验观测了种子注入对巨脉冲建立时间、光斑模式以及能量的影响。该系统可应用于受激布里渊散射(SBS)、大视场风洞全息以及光学合成孔径等研究领域。

**关键词** 激光技术; 单纵单横激光器; 种子注入; 自滤波非稳腔; 干涉测量法

**中图分类号** TN 248.1      **文献标识码** A

## Single Axial and Transverse Mode Electro-Optic Q-Switched Laser Based on Injection-Seeding Technique and Self Filtering Unstable Resonator

GUO Shao-feng<sup>1,2</sup>, LIN Wen-xiong<sup>1</sup>, LI Quan<sup>3</sup>, CHEN Sui<sup>2</sup>,

LIN Zhong-zhi<sup>2</sup>, HUANG Jian-hong<sup>1</sup>, LU Qi-sheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China  
<sup>2</sup> College of Opto-Electric Science and Technology, <sup>3</sup> College of Science,  
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** A single axial and transverse mode Q-switched pulsed laser system is demonstrated based on injection seeding and fast resonance detection technique combined with self filtering unstable resonator. 600 mJ energy at 1064 nm and 300 mJ energy when frequency-doubled, are achieved at Fourier-transform limit and with a beam divergence near diffraction-limit. The system is also characterized by the long-term stability in high vibration environments. The influence of injection-seeding on giant pulse setup time, beam-spot mode, and energy is observed experimentally. The perfect laser radiation is desirable in the area such as nonlinear optics, optical synthesized aperture and high-resolution spectroscopy.

**Key words** laser technique; single axial and transverse mode laser; injection-seeding; self filtering unstable resonator; interferometry

## 1 引 言

电光调 Q 技术将激光能量压缩到纳秒的时间尺度,从而使激光强度提高了几个数量级,电光调 Q 激光器成为目前应用最广泛的光源之一。但是,常规的电光调 Q 固体激光系统一般都在多横模和多纵模的条件下工作,空间分布和时间波形均存在较大

幅度的调制,这种调制严重影响到激光的相干性。在许多科学研究以及国防工业、医疗等应用领域,多纵模和多横模的激光光源不能满足人们对相干性的要求,不适于进行一些有较高精度要求的定量分析,例如大视场风洞全息、光学合成孔径以及固体介质受激布里渊散射(SBS)的研究。因此人们希望在时域和空域对激光振荡过程进行精细控制,以获得较

收稿日期: 2006-03-28; 收到修改稿日期: 2006-06-12

基金项目: 福建省青年科技人才创新项目(2004J040)和国家自然科学基金(10504043)资助课题。

作者简介: 郭少锋(1975—),男,河南平顶山市人,中国科学院福建物质结构研究所博士后,国防科技大学讲师,主要从事激光器件和激光破坏机理研究工作。E-mail: sfguo@nudt.edu.cn

大能量的单纵模以及单横模的输出<sup>[1~3]</sup>。

本文将自滤波非稳腔技术和种子注入、干涉法腔模锁定技术有机地集成在同一台激光器系统上,经放大后实现了单脉冲能量600 mJ的电光调Q输出,光束质量接近衍射极限,线宽接近傅里叶变换极限,单纵模概率100%。

## 2 自滤波非稳腔

一个稳定的、具有较高的提取效率和较强的模式甄别能力的腔结构是实现单纵单横系统的前提和关键。正支非稳腔(PBUR)是人们应用较多的腔结构,但是输出的光斑具有明显的子结构,例如衍射环等,其应用在许多领域受到限制。在Nd:YAG激光器系统中采用自滤波非稳腔(Self-Filtering Unstable Resonator(SFUR))<sup>[4,5]</sup>可避免这些问题。自滤波非稳腔的典型结构如图1所示,其特点是在实共焦非稳腔(腔镜 $M_1$ 和 $M_2$ ,焦距 $f_1 < f_2$ )的公共焦平面处放置一个滤波小孔,小孔的半径( $a$ )与艾里斑半径( $\rho_A$ )相等,即 $a = \rho_A = (0.61\lambda f_1)^{1/2}$ 。这意味着小孔的衍射效应和 $M_1$ 的聚焦作用相互抵消,小孔处的“热斑(hot spot)”被去除了。同时, $M_1$ 和小孔的组合相当于一个低通滤波器,空间频率高于 $(0.61\lambda f_1)^{1/2}$ 的振荡成分被截止,由此产生非常强的模式鉴别能力,易于输出没有任何空间调制的光滑基横模激光。另外,该结构的优点还在于激光在腔内往返一两次就能获得近衍射极限的激光输出。

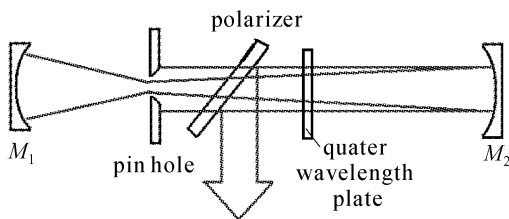


图1 自滤波非稳腔示意图

Fig. 1 Schematic of self-filtering unstable resonator

基于自滤波非稳腔结构,设计了一套电光调Q系统并进行了出光实验。设计参数为: $f_1 = 250$  mm,  $f_2 = 750$  mm,  $a = 400$   $\mu$ m。基于衍射理论的数值分析,该腔的有效放大系数 $M_{\text{eff}} = 1.5f_2/f_1 = 4.5$ ,计算得到激光光斑的直径应为 $4.5 \times 2a = 3.6$  mm,与实测的结果基本一致。Nd:YAG棒的尺寸为 $\phi 7$  mm $\times$ 110 mm,采用双灯抽运,选用紧抱椭圆型的聚光腔。针孔(Pin Hole)的材料为不锈

钢,面对激光棒的一面加工成一定角度的锥面以防止放大自发辐射(ASE)发生。为补偿热效应带来的光束会聚,须将腔镜 $M_2$ 前移,实验给出的最佳腔长为96 cm,此时发散角最小,小于0.5 mrad,接近衍射极限。

激光器在调Q工作方式下最高输出能量为150 mJ,脉宽为10~26 ns。光斑呈光滑的高斯分布,几乎没有任何子结构出现,图2(a)所示为在距离偏振片3 m处用CCD采集到的光斑图样,此时对应的激光能量为50 mJ。为满足特殊用途的要求,我们将倍频光的光斑直径扩束至20 cm,在距离出射口6 m处用军用航空底片照相,其结果如图2(b)所示。

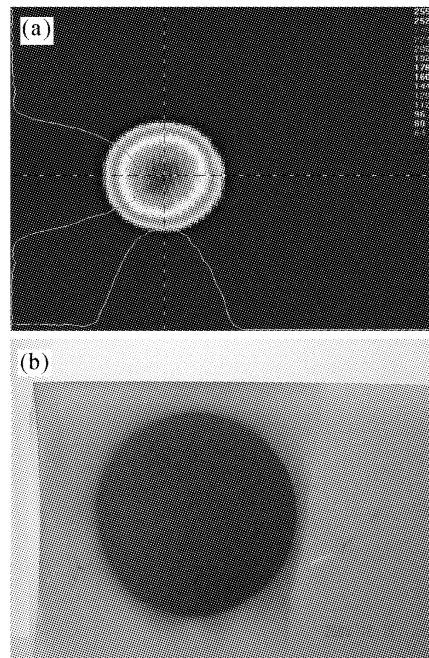


图2 自滤波非稳腔输出的典型光斑图样

(a) CCD采集;(b) 航空底片照相

Fig. 2 Typical beam shapes of laser based on SFUR design

(a) recorded by CCD; (b) by aerial film

为了控制总腔长在1 m以内, $M_2$ 的焦距选择得比较小,系统的放大系数仅为4.5,导致输出的激光光斑相对较小。较小的光斑,又导致激活介质的填充因子较小,系统的能量利用率也较低。如果想进一步提高系统的输出,一方面可以选用焦距更长的腔镜 $M_2$ ,另一方面可以选用更小直径的激光棒,例如 $\phi 6$  mm甚至 $\phi 5$  mm。

自滤波非稳腔结构除了能实现单横模输出外,对单纵模的实现也起到至关重要的作用,这主要体现在这种设计既有效保护了光电二极管(PIN)探测

器和种子激光器,又使横模匹配问题简单化,且与其他腔结构相比,大大增强了腔模锁定过程中干涉信号的对比度。

### 3 种子注入及腔模锁定

在调 Q 激光器中,单纵模输出与高峰值功率之间是相互矛盾的。高峰值功率激光器中一般都有多个高出振荡阈值的纵模,为实现单纵模输出必须插入诸如法布里-珀罗(F-P)标准具这样的选模器件,这些元件不仅增加了腔内损耗,而且和其他多种单纵模技术(如预激光+标准具)一样,不能保证长期稳定的 100% 单纵模输出。结合腔模锁定的种子注入技术是一种非常好的单纵模解决方案。

种子注入技术<sup>[6~11]</sup>是指将单纵模种子源(一般为连续光)注入高功率振荡器的谐振腔中,使激光振荡发自种子光形成的初始电场,而非多纵模情况下的自发辐射噪声。由于种子光的强度远远大于噪声辐射,从而使某个腔模形成优势振荡,脉冲建立时间短于其他模式,提前耗空了反转粒子数,抑制了其他模式,输出单纵模。种子光的频率与最接近的腔膜的频率之差,称为失谐量,失谐量越大,成功注入所需的种子光的功率也越大。例如<sup>[6]</sup>,在单程增益  $G = 4$  的情况下,20 MHz 的失谐量对应的最小注入功率大概为  $1 \text{ W/cm}^2$ ,而 100 MHz 的失谐量对应的最小注入功率则上升到  $10^4 \text{ W/cm}^2$ 。可见,控制失谐量在一定程度上对种子的成功注入是非常关键的。可是由于工作条件的波动以及环境温度、振动情况的影响,激光器的有效长度不断变化,导致共振频率也在自由光谱范围( $\text{FSR} = c/2L$ )内随机抖动,如果不采取有效的锁定方案,那么在较小的注入功率下(目前优良的激光二极管(LD)抽运的单频连续激光器的输出功率小于 200 mW),单纵模出现的概率将无法达到 100%。

典型的腔模锁定方法有两种:脉冲建立时间衰减法(BUTR)<sup>[8]</sup>和干涉法<sup>[9]</sup>。前者通过检测巨脉冲建立时间,根据在腔模匹配时建立时间最短的特点,利用伺服电路控制压电陶瓷(PZT)以使腔长一直处于动态平衡之中,这种方法要求激光的输出有很好的继承性,即激光不能工作在诸如较大振动、剧烈温升或强烈气流扰动的环境,因此基于该方法的单纵模系统不能满足许多军方应用的需求。干涉法是通过两路种子光的干涉情况来判断是否达到腔模匹配条件,并在腔模匹配时刻打开 Q 开关。如图 3 所

示,压电陶瓷在一个波长的范围内对谐振腔进行动态扫描,当 Q 开关处于关断状态时,注入的种子光(s 波)经偏振片  $P_1$  后耦合入激光腔,其中一部分光透过  $M_2$  后并经  $P_2$  再次起偏后到达光电二极管,另一部分光经  $M_2$  反射后到  $P_1$  处成为 p 波,环腔一周后又到达  $M_2$ ;这部分光又分为两束,其一透过  $M_2$  后在光电二极管与第一部分光发生干涉,另一束光又被  $M_2$  反射后经四分之一波片后变成 s 波,不能通过  $P_1$ ,故此时不能形成激光振荡。在压电陶瓷一个扫描周期内,有两个干涉峰值,每个峰值都代表着腔膜匹配时刻,此时打开 Q 开关,理论上可以获得单纵模输出。但是,反馈信息的处理以及 Q 开关的控制等过程需要一定的时间,导致 Q 开关打开的时刻已经不是腔膜匹配的最佳点,这相当于引入一定程度的频率失谐,如果失谐量过大(即时间延迟过长),则在特定注入功率下可能出现双纵模或多纵模现象。当然,对于电路带来的固定延时,也可以通过适当旋转偏振片  $P_2$  至一定角度进行光学补偿<sup>[10]</sup>,但是,这有可能带来非常严重的后果,当巨脉冲产生后,到达光电二极管的能量也将大大增加,探测器很容易遭到损坏。因此,首要的工作还是尽可能降低控制电路的时间延迟。

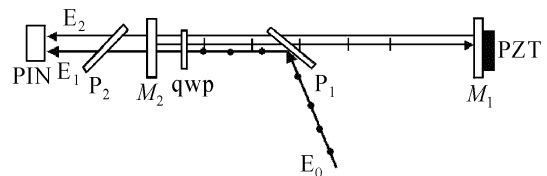


图 3 干涉法对应的两路种子光的光路

Fig. 3 Optical schematic of interferometric methods

采用快速数字逻辑电路复杂可编程逻辑器件(CPLD)来实现对干涉信号峰值位置的实时检测,成功地解决了传统的双微分电路存在的温度漂移问题以及电路延迟问题,从检测到峰值到打开 Q 开关的时间延迟控制在 300 ns 以内。图 4 为实验测量得到的干涉信号和 Q 开关的触发信号,通道 1 代表 Q 开关的触发信号。激光器的腔长为 1 m,则纵模间隔为 150 MHz,300 ns 的延迟相当于 4.5 MHz 的失谐量。如此小的失谐量,保证了低功率(毫瓦级)种子光注入的成功。

图 5 所示为种子光注入成功时对应的单纵模输出波形。利用两个不同响应速度(1 ns 和 0.1 ns)的探测器测量同一个脉冲,得到的结果基本相同,脉宽约为 15 ns,形状为光滑的高斯分布,没有多纵模相

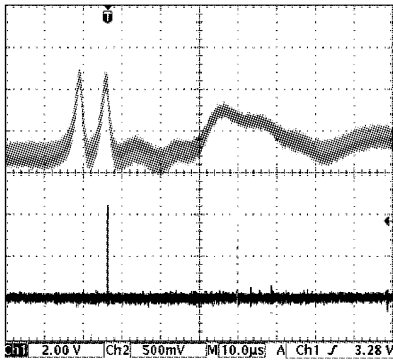


图 4 实验探测到的典型的种子光干涉图样

Fig. 4 Resonance detection signal for interferometric methods

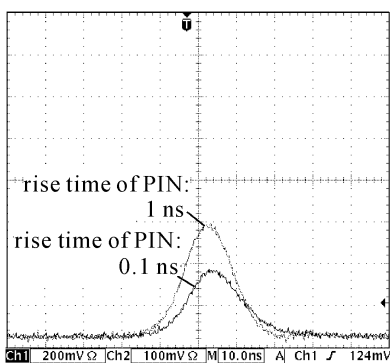


图 5 单纵模激光的时间分布

Fig. 5 Oscilloscope trace of single axial mode laser

互作用出现的毛刺(拍频)现象。这表明激光的相干性有了极大的提升,由多纵模情况下的几个厘米提升到3 m以上。

#### 4 激光器整机实验

基于上述技术方案,成功研制出一套稳定的单纵单横 Nd:YAG 激光系统,其结构简图如图 6 所示。种子激光器采用 Lightwave 公司的 126-1064-100 型单频激光器,输出波长为 1064 nm,最高功率为 100 mW,TEM<sub>00</sub> 模,束腰直径约为 0.4 mm,发散角约为 3.5 mrad,线宽小于 5 kHz。种子光经过一个 60 dB 的光隔离器后,由  $\lambda/2$  波片调整偏振态,由望远镜系统准直,然后经由全反镜和偏振片注入到功率振荡器的谐振腔,最终注入到激光介质中的功率最高可达 20 mW。增益介质棒两端增加了一组  $\lambda/4$  波片,其目的是为了消除空间烧孔效应<sup>[12]</sup>。干涉信号采用 Thorlabs 公司的 PDA400 型可调增益探测器来探测。通过调整注入功率和探测器的增益系数,使探测到的干涉信号幅度控制在 1~3 V,以便输入到复杂可编程逻辑器件控制电路中。该系统本

振级输出单纵模能量最高达到 120 mJ,能量起伏小于 3%。电光调 Q 的重复率最高为 20 Hz,可外控触发。在强振动、强气流环境内经过 1 万发的“烤机”实验,没有出现一次多纵模的情况,单纵模概率达到 100%。系统经过两级放大后基波能量可达到 600 mJ,KTP 倍频后绿光能量达 300 mJ。

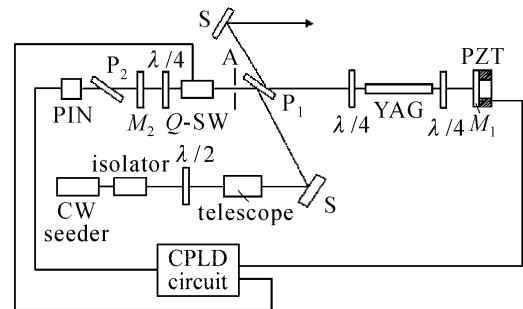


图 6 单纵单横 Nd:YAG 激光系统设计草图

Fig. 6 Design schematic for single axial and single transverse Nd:YAG laser system

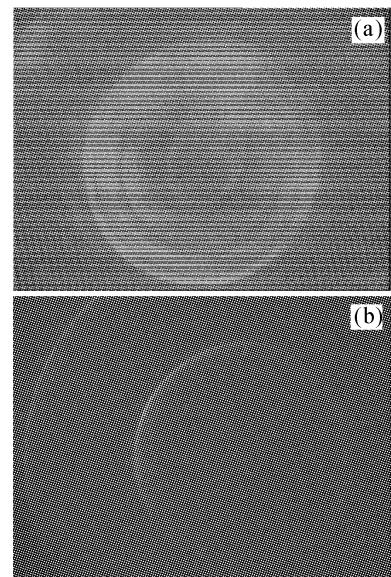


图 7 法布里-珀罗标准具的测量结果

(a) 注入前;(b) 注入后

Fig. 7 Measurement results of Fabry-Perot interferometer

(a) no injection-seeding; (b) injection-seeding

采用法布里-珀罗干涉仪测量了种子光注入前后巨脉冲激光的干涉图样,如图 7(a),(b)所示。在无种子光注入的情况下,存在多个纵模,CCD 图像模糊;在种子光注入并锁定的情况下,CCD 图像中只有一条谱线,说明激光输出为单纵模。

图 8 验证了脉冲建立时间衰减现象。示波器的第 1 路信号为激光信号,第 2 路信号为 Q 开关的电压波形,两路同步触发数字示波器,可得到巨脉冲的建立时间。图 8 对应的种子注入功率为 10 mW,输

出的单脉冲能量为 100 mJ。种子注入前, 初始激光在相对较弱的自发辐射中建立, 故脉冲建立时间较长, 为 148 ns; 种子注入后, 种子光成为激光振荡的初始光场, 脉冲建立时间提前了 30 ns。

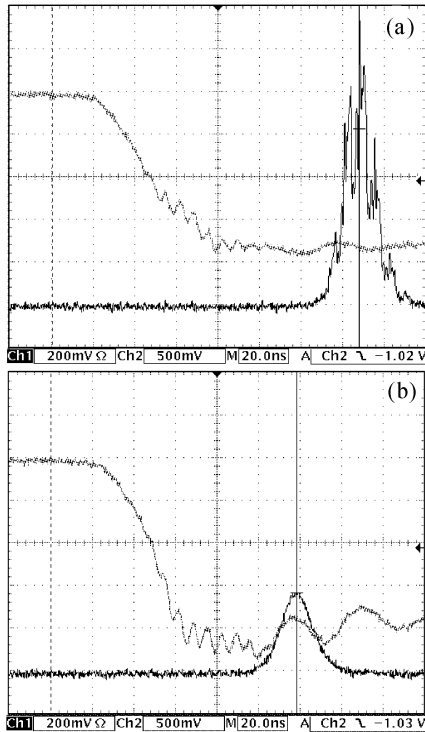


图 8 种子光注入前后脉冲建立时间的比较

(a) 注入前; (b) 注入后

Fig. 8 Buildup time of the Q-switched pulse from the oscillator

(a) no injection-seeding; (b) injection-seeding

赵卫等<sup>[11]</sup>观测到种子注入能显著改善振荡光的空间分布。在实验中, 由于自滤波非稳腔结构输出的光斑本身就很优良, 注入前后并无明显变化。

经对比实验测量, 种子注入后巨脉冲激光能量仅为多纵模输出能量的  $2/3 \sim 3/4$ 。这个现象还从未见报道, 其机制尚在研究中。这种现象和脉冲建立时间衰减法一样, 可以用来开发新的锁定方案, 可称之为 ER(Energy Reduction)方法, 现在正在设计电路, 尝试应用于新的单纵模激光系统中。

## 5 结 论

文中的工作侧重于技术路线的确定、实现以及最终的产品化。系统中相当一部分器件选自实验室

现成的储备, 在效率方面未做特殊的考虑。最终获得了 600 mJ 的优质单纵模输出, 这已经达到了用户的要求。如果再采取一些特别的措施, 例如优化光斑尺寸与激光棒尺寸的匹配关系以提高填充因子、在腔内插入缩束透镜组以减少光阑带来的遮光损耗等, 这将使系统的整体效率大大提高。

## 参 考 文 献

- Liu Lang, Bi Guojiang, Huang Maoquan *et al.*. High repeating rate and big energy single-longitudinal-mode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):885~889  
刘 郎, 秘国江, 黄茂全 等. 高重复频率大能量单纵模激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(10):885~889
- Shen Xiaohua, Chen Shaohu, Ge Xiaping *et al.*. Regenerative amplification of single-axial-mode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(11):817~822  
沈小华, 陈绍和, 葛夏平等. 单纵模激光的再生放大 [J]. *中国激光*, 1995, **A22**(11):817~822
- A. J. Egorov, V. V. Korobkin, R. V. Serov. Single longitudinal Q-switched neodymium laser [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1975, **5**:291~293
- P. G. Gobbi, S. Morosi, G. C. Reali *et al.*. Novel unstable resonator configuration with a self-filtering aperture: experimental characterization of the Nd:YAG loaded cavity [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(1):26~33
- P. Di Lazzaro, Theo W. P. M. Hermsen, Chengen Zheng. A generalization of the self-filtering unstable resonator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(8):1543~1547
- Y. K. Park, G. Giuliani, Robert L. Byer. Single axial mode operation of Q-switched Nd:YAG oscillator by injection seeding [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1984, **QE-20**(2):117~125
- S. Edward, Qiquan Hu, Xingfu Li. Single frequency operation of an injected-seeded Nd:YAG laser in high noise and vibration environments [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(9):1015~1017
- Larry A. Rahn. Feedback stabilization of an injection-seeded Nd:YAG laser [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(7):940~942
- S. W. Henderson, E. H. Yuen, E. S. Fry. Fast resonance-detection technique for single-frequency operation of injection-seeded Nd:YAG lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(11):715~717
- Li Feng, Lu Zukang, Zhao Lan *et al.*. An optical compensation method for improving the performance of injection seeded Nd:YAG lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(11):1479~1483  
李 峰, 陆祖康, 赵 岚 等. 用于提高种子注入 Nd:YAG 激光器性能的一种光学补偿方法的设计计算 [J]. *光学学报*, 1998, **18**(11):1479~1483
- Zhao Wei, Wang Tao, Zhu Shaolan *et al.*. Characteristic of injection-seeding Q-switched laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(6):712~716  
赵 卫, 王 涛, 朱少岚 等. 种子注入的短脉冲激光器特性研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(6):712~716
- V. Evtuhov, A. E. Siegman. A "twisted mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity [J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(1):142~143